

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 681.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЧЁТКИХ МНОЖЕСТВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ

И. В. Коноваленко, О. А. Пастух, П. О. Марущак

*Тернопольский национальный технический университет им. Ивана Пулюя,
46001, Украина, г. Тернополь, ул. Русская, 56
E-mail: Maruschak.tu.edu@gmail.com*

Рассмотрена задача оценки влияния переменных параметров существующего алгоритма распознавания дефектов поверхности на результат его работы. Предложен способ оценивания влияния переменных параметров на распознанные геометрические характеристики сетки повреждений поверхности. Этот способ основан на представлении базовых зон каркаса сетки повреждений поверхности в виде компактных нечётких множеств в двумерном пространстве (нечётких квазиточек). Множество точек распознанного объекта, полученных при различных комбинациях параметров исследуемого алгоритма, представляют в виде нечёткого множества с определённой функцией принадлежности. Рассмотрен способ расчёта геометрических параметров сетки повреждений (длины и наклона) с помощью средств нечёткой геометрии и продемонстрировано его использование при определении геометрических параметров сетки повреждений ролика машины непрерывного литья заготовок.

Ключевые слова: распознавание изображений, распознавание повреждений, нечёткая квазиточка, нечёткая геометрия, нечёткое расстояние.

DOI: 10.15372/AUT20160401

Введение. Оценка состояния рабочей поверхности ряда механизмов и покрытий по их цифровому изображению получила широкое распространение [1–3]. Такой подход позволяет автоматизированно проанализировать поверхность и получить важную информацию о поверхностных и внутренних изменениях в структуре материала, представляющих интерес с точки зрения его эксплуатационных характеристик. Особенно это актуально на начальном этапе разрушения материала, который сопровождается поверхностными явлениями: трещинами, деформациями и другими.

Исследовать элементы поверхности данным методом можно, если начальные и повреждённые фрагменты на изображении отличаются цветом и/или текстурой [2, 3]. Изображения таких поверхностей показаны на рис. 1.

Особенностью методов, основанных на анализе изображения, является то, что на конечный результат распознавания и вычисления параметров повреждений влияет много факторов: от изменения оптических свойств исследуемой поверхности и специфики её освещения при получении фотоизображения до параметров алгоритма, который используется для обработки изображения. Таким образом, результат на одном и том же изображении при разных параметрах будет отличаться. Задача выбора точных значений параметров алгоритма для распознавания довольно сложная и не всегда может быть решена однозначно. Поэтому важны оценка влияния параметров алгоритма на конечный результат и

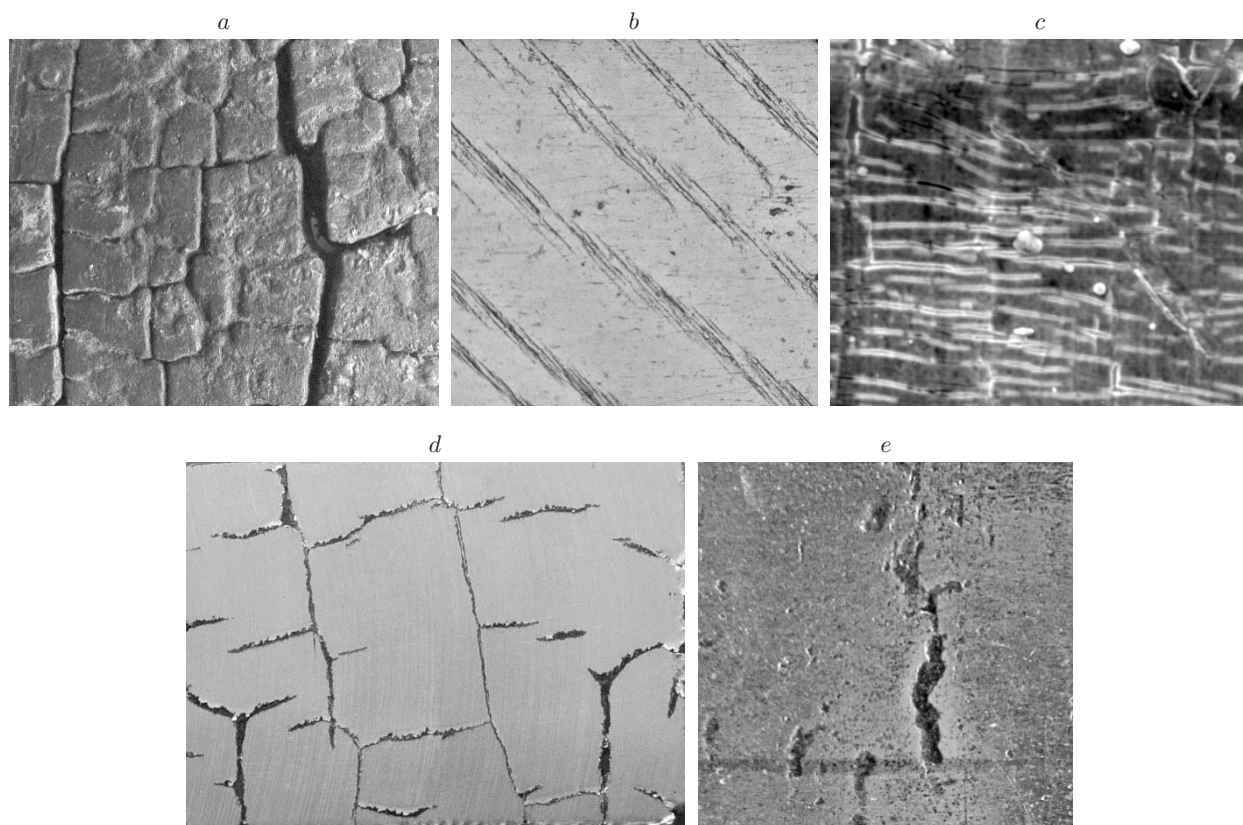


Рис. 1. Изображения поверхностных повреждений: ролика машины непрерывного литья заготовок (а, d), поликристаллического алюминиевого сенсора усталости (b), циркониевого нанопокровы на стальной основе после циклической нагрузки (c), трубы газопровода «Киев — Запад Украины-1» (e)

оценка диапазона возможного отклонения конечных рассчитанных характеристик при изменении параметров алгоритма. Проблема точности различных методик обработки изображений рассматривается в [4–6]. Однако из-за сложности и разнообразия алгоритмов анализа изображений и наличия не контролируемых измерительной системой факторов (например, изменение освещённости поверхности) вопрос оценивания зависимости результатов распознавания от внутренних и внешних условий измерения остаётся открытым.

В данной работе предложен способ оценки вариативности результатов распознавания элементов структуры повреждённой поверхности при изменении основных параметров исследуемого алгоритма. Его суть состоит во множественном распознавании изображения при разных наборах значений параметров алгоритма, представлении полученных результатов в виде нечёткого множества и его последующего анализа.

Исследуемый алгоритм распознавания повреждённых поверхностей. В [2, 5, 7] разработан и описан алгоритм распознавания дефектов изображения и расчёта их количественных характеристик: координат, длины, наклона, площади, количества. Такие характеристики позволяют оценить общее состояние исследуемого образца и выявить основные кинетические закономерности накопления повреждений [8].

Исходным для алгоритма является цифровое изображение повреждённой поверхности в оттенках серого цвета. Базовый алгоритм распознавания положения элементов структуры повреждения (рис. 2) предусматривает операции выравнивания освещённости начального изображения, его фильтрации, бинаризации полученного изображения и скелетиза-

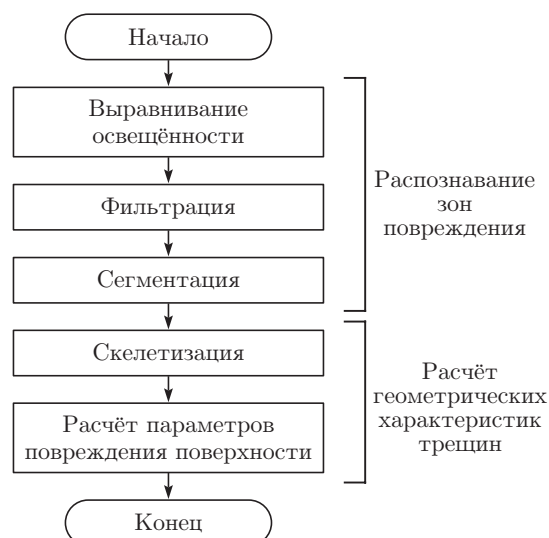


Рис. 2. Блок-схема базового алгоритма распознавания дефектов изображения и расчёта их количественных характеристик

ции. Последовательность указанных операций задаёт множество точек, описывающих геометрические параметры сети повреждений на анализируемом изображении.

Для настройки оптимальной работы алгоритма используется ряд параметров, которые важны для правильного и точного распознавания искомых объектов. Рассмотрим основные шаги и параметры этого алгоритма.

Распознавание зон повреждения. Выравнивание освещённости исходного изображения I_0 (рис. 3, а) требуется для устранения влияния затенённых областей на результат работы алгоритма. Эта операция выполняется с помощью свёртки изображения с низкочастотным гауссовским фильтром и последующего устранения низкочастотной составляющей. Для фильтрации используется гауссовский фильтр с достаточно большим ядром, в результате формируется общая картина освещённости изображения $l'(x, y)$, где x — индекс колонки, $x = \overline{1, m}$; y — индекс строки изображения I_0 , $y = \overline{1, n}$. Конечное изображение получается после удаления из исходного изображения образованной картины освещённости $l'(x, y)$ и его нормализации.

Операция фильтрации предназначена для улучшения изображения и устранения шумовых фрагментов, и её вид зависит от особенностей входного изображения. Так, для изображений, где объекты распознавания характеризуются неоднородными оптическими характеристиками (например, рис. 1, а, с), использовали гауссовский фильтр, который позволил их сгладить [7]. К чётким изображениям с незначительными шумовыми элементами (например, рис. 1, б) применяли медианный фильтр [2]. При необходимости эти два вида фильтрации сочетали [5]. Для фильтрации важным параметром является размер ядра фильтра, поскольку его изменение заметно влияет на процессы «отсеивания» фоновых пикселей, объединения обособленных фрагментов объекта распознавания и на конечный результат распознавания.

После предварительной обработки исходного изображения I_0 проводили его сегментацию. На изображении определяли информативные пиксели, соответствующие повреждённым зонам. В базовом алгоритме для сегментации использовалось бинарное преобразование. При этом строилась гистограмма распределения яркости и находилось предельное значение, отделяющее пиксели фона от информативных точек. Результатом стало бинарное изображение I (рис. 3, б), на котором элементам деформационного рельефа соответ-

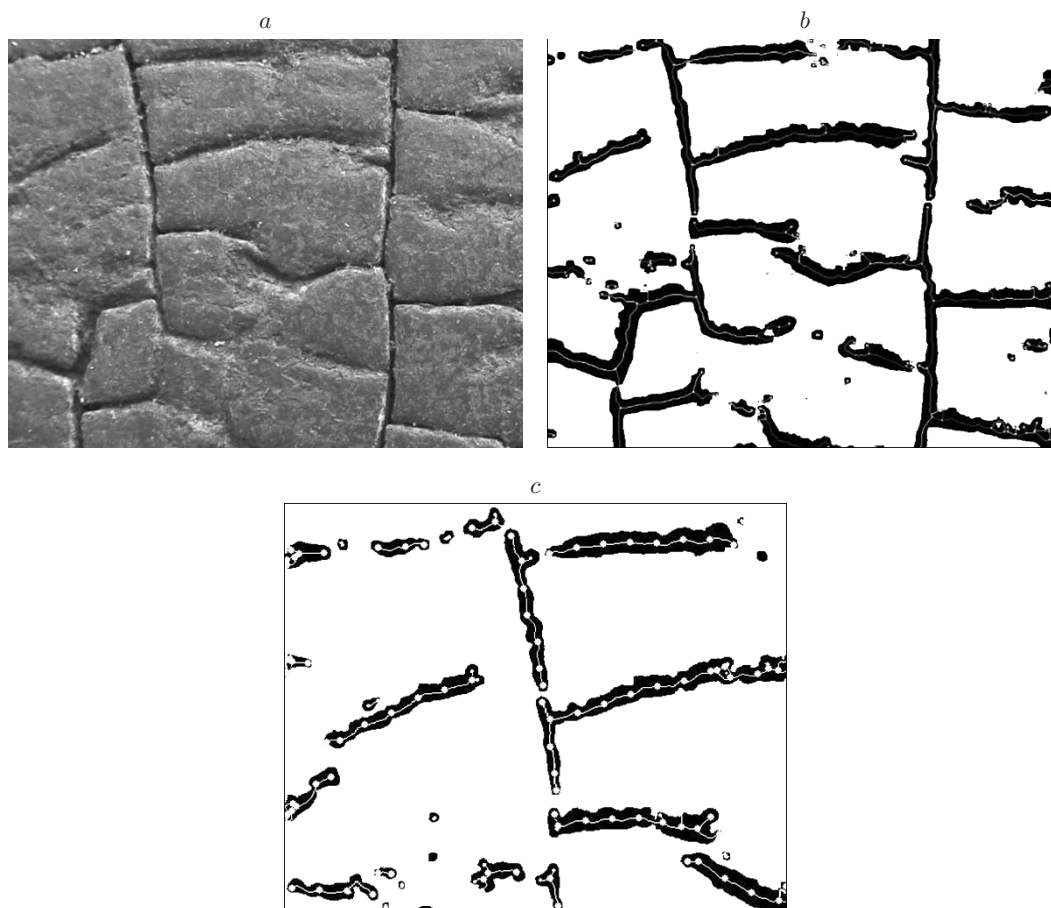


Рис. 3. Изображение поверхности ролика машины непрерывного литья заготовок: исходное изображение с повреждениями в виде трещин (а); результат сегментации исходного изображения (b); увеличенный фрагмент распознанного изображения с нанесёнными каркасными линиями и опорными точками (с)

вуют чёрные пиксели (информативные), а элементам фона — белые. Для изображений с визуально неоднородными объектами применялось двухуровневое бинарное преобразование [9].

В любом случае деление параметров распределения пикселей на фоновые и принадлежащие объекту существенно влияет на результат распознавания. Неправильный их подбор приведёт к тому, что часть объектов будет распознана как фон или будут найдены фантомные объекты, которые в действительности являются фоном. В частности, изменение границы фона бинарного преобразования вызывает смещение края найденных на изображении объектов. Вследствие этого могут изменяться геометрические характеристики распознанных повреждений (трещин), рассчитанные с помощью алгоритма.

Полученное в результате указанных преобразований изображение содержит информацию о форме и площади трещин, однако не может непосредственно использоваться для определения количественных параметров: числа трещин, их длины, наклона и т. д.

Для выделения совокупности точек, которыми можно описывать структуру сети повреждений, проводится скелетизация [5, 7]. Эта операция позволяет отметить на изображении срединные линии толщиной 1 пиксель, формирующие каркас трещин (рис. 3, с). Такие линии назовём каркасными линиями распознанных объектов повреждения.

Вычисление геометрических характеристик трещин. На полученных каркасных линиях определяют совокупность опорных точек, которые являются входным набором данных для дальнейших аналитических расчётов (см. рис. 3, с). Опорные точки выбирают на концах каркасных линий, в местах их разветвления и перегиба. Используя множество опорных точек, можно вычислить длину дефектов поверхности, их наклон относительно координатных осей изображения, рассчитать положение и количество квазилинейных фрагментов. Эти данные применяются для анализа состояния поверхности и исследования закономерностей её разрушения [7].

На координаты точек каркасной линии влияют различные параметры алгоритма. Установлено, что наибольшее воздействие оказывает изменение размера ядра фильтра и границы фона во время сегментации [5, 7]. Для некоторого вида изображений установлено, что отклонение точек срединной линии при таких параметрах алгоритма в общем невелико и колеблется в пределах 0–20 пикселей, что может вызвать относительную погрешность при определении длины трещины от 5 до 25 % [5]. Однако приведённые числовые значения индивидуальны и задаются многими как внутренними, так и внешними по отношению к алгоритму факторами. Поэтому при анализе полученных результатов важна оценка возможного их отклонения вследствие изменения параметров алгоритма.

Для учёта вариативности данных результатов предложен новый метод. Он заключается в представлении совокупности результатов распознавания, полученных при разных наборах значений параметров алгоритма, в виде нечёткого множества с определённой функцией принадлежности. Далее в этом множестве выделяются подмножества, соответствующие опорным зонам распознанного объекта, которые анализируются с помощью нечётких множеств.

Вычисление геометрических параметров повреждений поверхности с учётом вариативности, вызванной изменением параметров исследуемого алгоритма. *Отображение результатов расчётов в общее параметрическое пространство.* Примем I — множество яркостей точек изображения, которое является подмножеством двумерного пространства \mathbb{N}^2 , а $i(x, y)$ — яркость пикселя с координатами (x, y) . Таким образом, $I = \{i(x, y) \mid x = \overline{1, Iw}, y = \overline{1, Ih}\}$, где Iw, Ih — ширина и высота изображения I соответственно. Для стандартного представления изображения в оттенках серого цвета $i(x, y) \in [0-255]$.

Определим множество переменных параметров алгоритма, существенно влияющих на результат его работы, как $A = \{\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_\eta\}$, где η — количество параметров. Например, Π_1 отвечает параметру «размер ядра фильтра», Π_2 — параметру «граница бинарного преобразования» и т. д. Значение каждого из параметров Π_i может изменяться в диапазоне $[\pi_{i \min}, \pi_{i \max}]$ с шагом $\delta\pi_i$. Тогда $P = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_\eta)$ — конкретный набор значений параметров, при которых получена каркасная линия.

Обозначим множество всех точек рассматриваемого изображения, принадлежащих каркасным линиям при данном наборе значений параметров алгоритма, через

$$F(P) = \{(x, y) \mid \chi_F(x, y, P) = 1\}, \quad \chi_F(x, y, P) = \begin{cases} 1, & \forall i(x, y) \in F(P), \\ 0, & \forall i(x, y) \notin F(P), \end{cases} \quad (1)$$

где χ_F — характеристическая функция равная 1, если пиксель (x, y) принадлежит каркасной линии, и равная 0 в противном случае.

Каждому набору значений параметров алгоритма P_k , $k = \overline{1, K}$, где K — количество наборов значений, соответствует своё множество точек $F(P_k)$. Определим функцию, под-

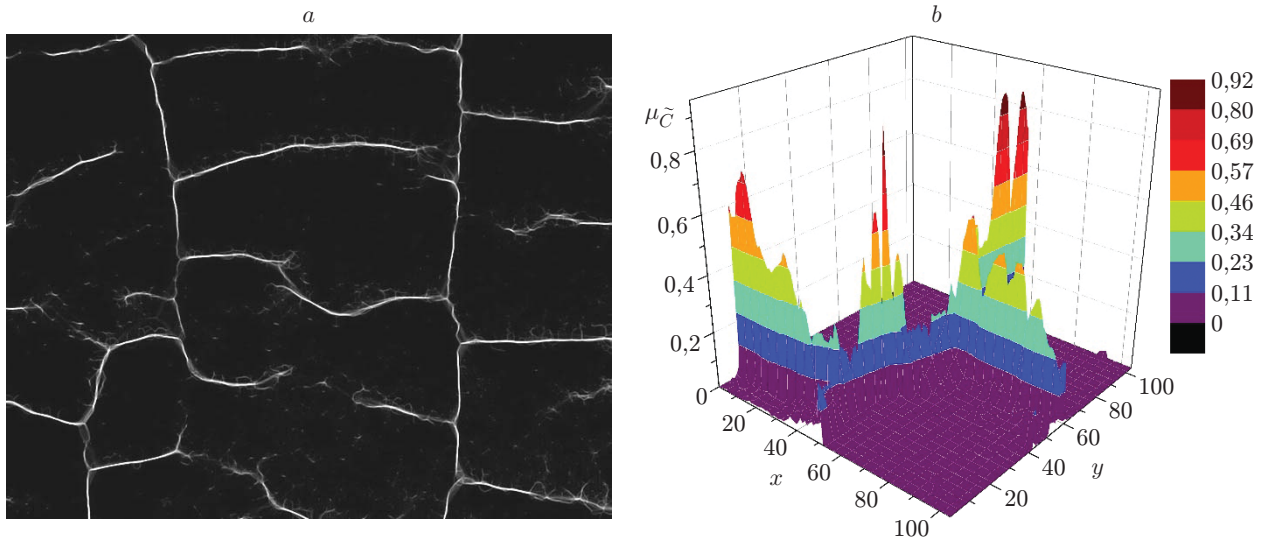


Рис. 4. Функция $S(x, y)$ подсчёта количества попаданий точки в каркасную линию: a — пример функции для изображения на рис. 3; b — фрагмент трёхмерного представления нечёткого множества \tilde{C}

считывающую частоту попаданий точки (x, y) в каркасную линию для всех исследованных K наборов значений:

$$S(x, y) = \sum_{k=1}^K \chi_F(x, y, P_k). \quad (2)$$

Если представить функцию $S(x, y)$ как изображение в оттенках серого цвета (интенсивность пикселя представляет значение функции), то светлые участки будут отвечать частям изображения, на которых каркасная линия повреждения чаще распознавалась при различных наборах значений параметров $P = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_\eta\}$ (рис. 4, a). Этим зонам соответствуют пики в трёхмерном представлении (рис. 4, b). Ширина полос на изображении рис. 4, a (или ширина «горного хребта» на рис. 4, b) показывает разброс вычисленных значений.

Отметим, что функция, представленная на рис. 4, a , получена при совокупности значений параметров алгоритма, значительно превышающих границы их оптимального диапазона. Исследованная совокупность значений параметров включала такие наборы значений, при которых искомые на изображении объекты повреждений не распознавались вообще или же ложно распознавались практически на всей площади изображения. Тем не менее, несмотря на предварительное отсутствие оптимальных значений параметров алгоритма, функция $S(x, y)$ довольно чётко выделила наиболее вероятные зоны повреждений (см. рис. 3). Таким образом, есть предпосылки для самонастраивания (автоматического поиска оптимальных значений параметров) предложенного алгоритма, но этот вопрос выходит за рамки данной работы.

Если значение функции $S(x, y)$ нормализовать, то изображение на рис. 4, a можно представить в виде нечёткого множества $\tilde{C} = \{(x, y) \mid \mu_{\tilde{C}}(x, y)\}$, функция принадлежности которого $\mu_{\tilde{C}}(x, y)$ будет определяться выражением

$$\mu_{\tilde{C}}(x, y) = S(x, y) / \sup(S). \quad (3)$$

Функция принадлежности $\mu_{\tilde{C}}(x, y)$ задаёт вероятность попадания точки (x, y) в каркасную линию для исследованной совокупности значений параметров алгоритма. Тогда

точки, относящиеся к каркасным линиям, с определённой вероятностью содержат α -срез:

$$\tilde{C}(\alpha) = \{(x, y) \mid \mu_{\tilde{C}}(x, y) \geq \alpha\}, \quad \alpha \in [0, 1]. \quad (4)$$

Нечёткое множество \tilde{C} содержит полную информацию о степени принадлежности его точек каркасным линиям повреждений поверхности. Оно рассчитано с использованием всех возможных наборов значений параметров $\{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_\eta\}$ и представляет собой нечёткую каркасную линию этих повреждений.

Выявление опорных квазиточек в нечётком множестве. Для возможности практического применения математического аппарата нечёткой геометрии к полученным результатам введём понятие нечёткой квазиточки. Нечёткой квазиточкой будем называть ограниченное нечёткое множество в пространстве \mathbb{R}^2 . Функция принадлежности нечёткой квазиточки $\tilde{P}(x, y)$ удовлетворяет условию: $\tilde{P}(\alpha)$ является ограниченным подмножеством \mathbb{R}^2 для всех α , $0 \leq \alpha \leq 1$.

Чтобы оценить степень отклонения координат каркасной линии в определённых зонах, выделим на изображении, представленном в виде функции $S(x, y)$ (см. рис. 4, а), опорные квазиточки, каждая из которых ограничена совокупностью связанных точек, расположенных в узловых местах нечётких каркасных линий. К таким местам относятся конечные зоны нечётких каркасных линий, зоны их перегиба и зоны разветвления.

Для выделения опорных квазиточек выполним ряд операций. Сначала сформируем множество $F_f \subseteq \tilde{C}(\alpha_0)$, применив алгоритм скелетизации к α -срезу $\tilde{C}(\alpha_0)$. Величина α_0 определяет нижнее предельное значение, так что для всех α -срезов $\tilde{C}(\alpha)$ при $\alpha < \alpha_0$ все точки $(x, y) \notin \tilde{C}(\alpha_0)$ считаются шумом, для них принимается $\mu_{\tilde{C}}(x, y) = 0$. В результате получим разветвлённую цепочку точек с единичной толщиной F_f , которая гарантированно проходит вдоль всех веток α -среза $\tilde{C}(\alpha_0)$ от начала до конца (рис. 5).

Далее в множестве точек F_f выделим подмножество узловых точек $F_{fo} = \{f_{fo}\}$, к которым относятся концы веток, принадлежащих F_f , точки перегиба и точки ветвления. Подмножество $F_{fo} \subseteq F_f$ сформируем последовательным перебором элементов F_f и отбором тех, которые удовлетворяют условиям: являются начальными точками (имеют одного соседа), точками ветвления (имеют более двух соседей) и точками перегиба (в них аппроксимирующая прямая отклоняется больше определённого допустимого значения угла φ относительно предыдущего участка).

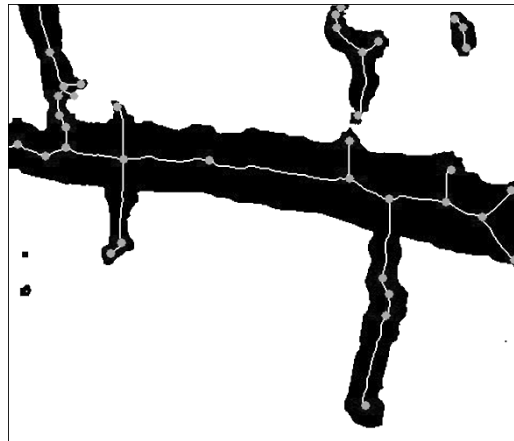


Рис. 5. Фрагмент α -среза $\tilde{C}(\alpha_0)$ нечёткого множества (светлая линия единичной толщины представляет собой множество F_f , светлые кружки — подмножество узловых точек F_{fo})

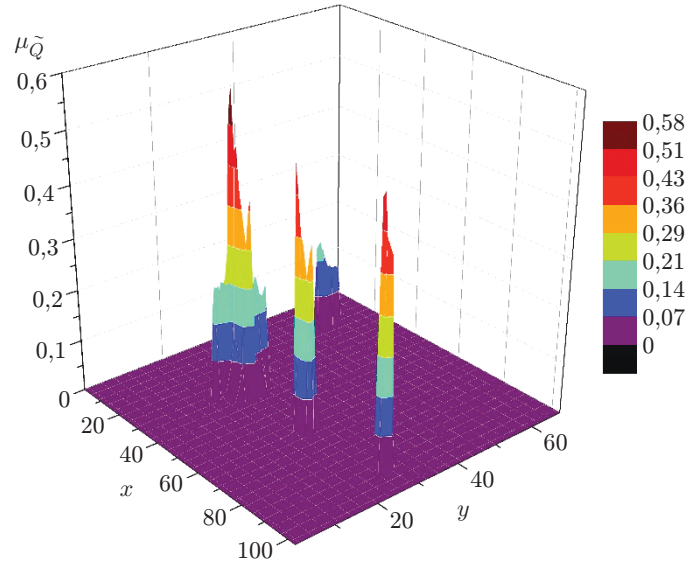


Рис. 6. Трёхмерное представление нечётких множеств \tilde{Q} , которые описывают квазиточки нечёткого каркаса

Как квазиточки будем рассматривать окрестность точек $f_{fo} \in F_{fo}$ с радиусом $\rho(f_{fo})$ в множестве \tilde{C} . Пусть $d(u, v)$ — евклидова метрика расстояния между точками u и v . Окрестностью произвольной точки u будем считать нечёткое подмножество $\tilde{Q} \subseteq \tilde{C}$:

$$\tilde{Q} = \{\tilde{C}(x, y) \mid d((x, y), u) \leq \rho(f_{fo}), \mu_{\tilde{C}}(x, y) \geq \alpha_0\} \quad (5)$$

с функцией принадлежности

$$\mu_{\tilde{Q}}(x, y) = \mu_{\tilde{C}}(x, y). \quad (6)$$

Пусть N_r — подмножество точек двумерного пространства \mathbb{N}^2 , расположенных в пределах окружности с центром в точке u и радиусом r : $N_r = \{(x, y) \mid d((x, y), u) \leq r\}$, $r \in \mathbb{N}$. Радиус окрестности определим как максимальный радиус, при котором относительная доля элементов множества \tilde{C} , попадающих в окружность с центром в точке u , будет не меньше, чем предельное значение δ_ρ :

$$\rho(f_{fo}) = \sup\{r \mid |\tilde{Q}|/|N_r| \geq \delta_\rho\}. \quad (7)$$

Нечёткое множество \tilde{Q} рассмотрим как нечёткую квазиточку. Выделенные описанным способом квазиточки представляют собой узловые точки нечёткого каркаса повреждений поверхности, на основании которых будут рассчитываться геометрические параметры повреждений: длина и наклон, а также оцениваться степень нечёткости полученных значений. На рис. 6 показан фрагмент трёхмерного представления группы нечётких множеств \tilde{Q} , которые соответствуют нескольким распознанным квазиточкам.

Для оценки разброса координат квазиточки используем внешний диаметр нечёткого множества [10]

$$E(\tilde{Q}) = \sup_{\xi} \left\{ \sum_{j=1}^{Ih\xi} \sup_{x(\xi)} \{\mu_{\tilde{Q}}(x(\xi), y(\xi)) \mid y(\xi), x = \overline{1, Iw_{\xi}}, y = \overline{1, Ih_{\xi}}\} \Delta x \mid \xi = \overline{0, \Xi} \right\}, \quad (8)$$

где ξ — угол поворота системы координат относительно исходного положения; $\Xi = 359$; Iw_ξ , Ih_ξ — ширина и высота изображения в направлении осей $x(\xi)$ и $y(\xi)$ соответственно; Δx — величина дискретизации, $\Delta x = 1$ пиксель.

Диаметр (8) зависит не только от геометрических размеров множества \tilde{Q} , но и от значения его функции принадлежности $\mu_{\tilde{Q}}$. Для чёткого множества внешний диаметр будет максимальным, когда ось $x(\xi)$ примет направление, при котором проекция множества \tilde{Q} имеет наибольший размер. Для изображения, функция $S(x, y)$ которого показана на рис. 4, *a*, внешний диаметр различных квазиточек колеблется в пределах от 2 до 14 пикселей, среднее значение составляет 4 пикселя.

Вычисление геометрических параметров сети повреждений с использованием нечётких квазиточек. За основу вычисления расстояния между нечёткими квазиточками взят подход, предложенный в [11]. Пусть \tilde{D} — нечёткое расстояние, а $\mu_{\tilde{D}}(d)$ — его функция принадлежности, тогда для определённого α -среза нечёткое расстояние между двумя нечёткими квазиточками \tilde{Q}_1 и \tilde{Q}_2 составит

$$\tilde{D}(\alpha) = \{d(u, v) \mid u \in \tilde{Q}_1(\alpha), v \in \tilde{Q}_2(\alpha)\}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1; \quad \mu_{\tilde{D}}(d) = \sup\{\alpha \mid d \in \tilde{D}(\alpha)\}, \quad (9)$$

где $\tilde{Q}_1(\alpha), \tilde{Q}_2(\alpha)$ — α -срезы нечётких множеств первой и второй квазиточек.

В общем случае функция принадлежности $\mu_{\tilde{D}}(d)$, описывающая распределение возможных значений длин между квазиточками, носит случайный характер. На рис. 7 показаны примеры графиков $\mu_{\tilde{D}}(d)$, полученных при анализе изображения (см. рис. 4), когда $\alpha = \alpha_0 = 0,04$.

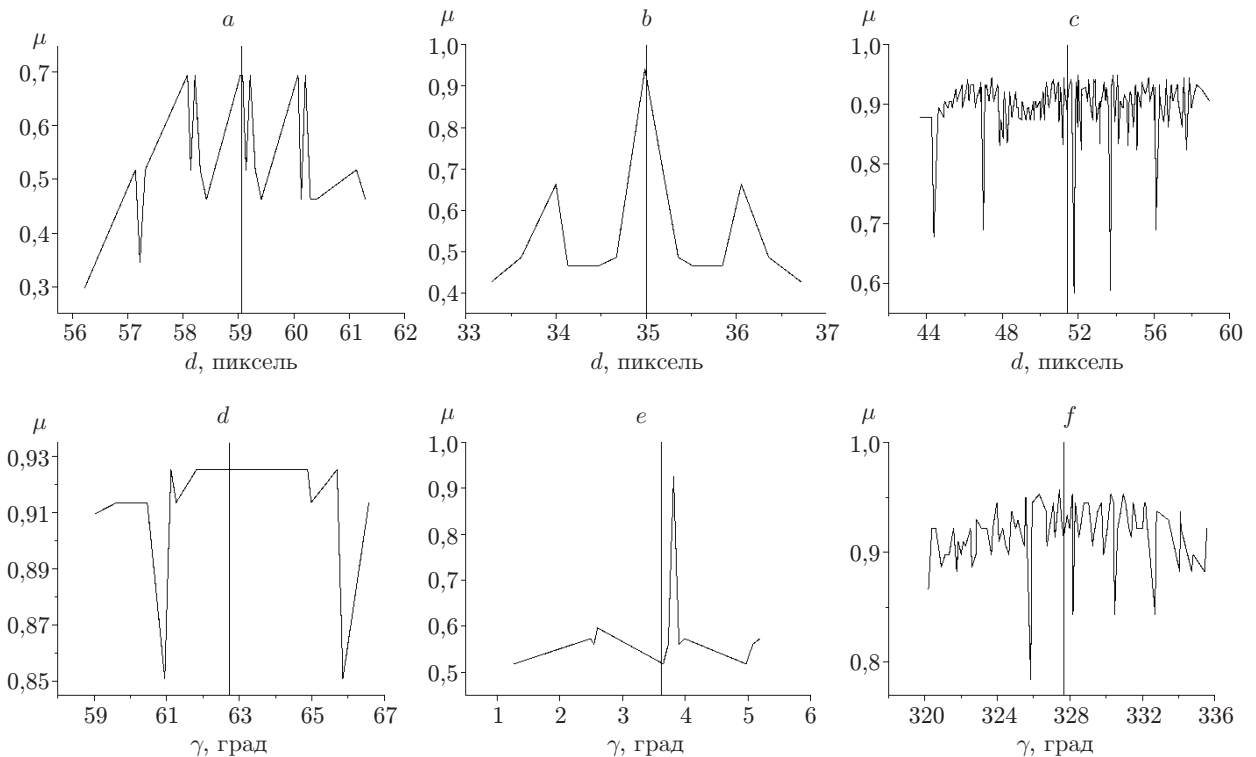


Рис. 7. Графики функции принадлежности μ для нескольких рассчитанных геометрических параметров трещин: функция μ для расстояний (*a*—*c*) и углов (*d*—*f*). Значения d_M , γ_M — результат дефазификации через центр масс функции принадлежности

Другой важный параметр, характеризующий сеть повреждений исследуемой поверхности, — угол наклона прямолинейных фрагментов. Пусть $\gamma(u, v)$ — угол наклона между точками u и v . Угол наклона каждого отрезка между двумя нечёткими квазиточками \tilde{Q}_1 и \tilde{Q}_2 рассмотрим как нечёткое число $\tilde{\Gamma}$ с функцией принадлежности $\mu_{\tilde{\Gamma}}(\gamma)$:

$$\tilde{\Gamma}(\alpha) = \{\gamma(u, v) \mid u \in \tilde{Q}_1(\alpha), v \in \tilde{Q}_2(\alpha)\}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1; \quad \mu_{\tilde{\Gamma}}(\gamma) = \sup\{\alpha \mid \gamma \in \tilde{\Gamma}(\alpha)\}. \quad (10)$$

Для нечётких расстояний (9) и углов (10) функция принадлежности показывает вероятность того, что для исследованного набора значений параметров измеряемая величина примет определённое значение. В общем случае при более высоких значениях α разброс функций принадлежности $\mu_{\tilde{D}}(d)$ и $\mu_{\tilde{\Gamma}}(\gamma)$ будет уменьшаться и интервалы их областей определённости будут сужаться.

Для чёткой оценки полученного нечёткого параметра (длины, угла наклона) выполняется дефазификация по формуле центра масс

$$x_M = \sum x_i \mu(x_i) / \sum \mu(x_i), \quad (11)$$

где x_i — элементы нечёткого множества \tilde{X} . На рис. 7 показаны вычисленные таким образом точные значения расстояния d_M и угла наклона γ_M .

Нечёткие множества \tilde{D} и $\tilde{\Gamma}$ содержат полную информацию о расчёте длины или наклона прямолинейного фрагмента распознанного на изображении каркаса. Она получена при различных наборах значений параметров алгоритма распознавания. Таким образом, когда чёткие критерии выбора значений параметров алгоритма отсутствуют, разработанный алгоритм позволяет проанализировать результат совокупности возможных значений каждого параметра. Это даёт возможность рассчитать наиболее вероятное положение каркасной линии повреждения для всех исследованных наборов значений параметров. Для оценки параметров разброса вычисленных значений можно использовать, например, математический аппарат теории вероятностей [3, 12].

Заключение. В данной работе предложен способ измерения геометрических параметров прямолинейных элементов каркаса объекта путём распознавания его цифрового изображения, учитывающий неоднозначность распознавания объекта при различных значениях параметров. Он заключается в представлении совокупности результатов распознавания, полученных при разных наборах значений параметров исследуемого алгоритма, в виде нечёткого множества с определённой функцией принадлежности. Далее в этом множестве выделяют подмножества, соответствующие опорным зонам распознанного объекта. Такие подмножества предложено описывать с помощью квазиточек, каждая из которых представляет собой ограниченное нечёткое множество в двумерном пространстве. Геометрические параметры линейных элементов между квазиточками (длину и наклон) рассчитывают с помощью средств нечёткой геометрии и представляют в виде нечётких чисел.

Алгоритм, реализующий предложенный способ, даёт возможность проводить распознавание повреждений поверхности при отсутствии предварительно вычисленных значений параметров алгоритма. Такой подход учитывает и позволяет оценивать влияние совокупности значений параметров исследуемого алгоритма на конечный результат распознавания. Продемонстрировано использование алгоритма для расчёта параметров повреждений поверхности материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gavilán M., Balcones D., Marcos O. et al. Adaptive road crack detection system by pavement classification // Sensors. 2011. 11, Is. 10. P. 9628–9657.

2. **Konovalenko I., Maruschak P., Menou A. et al.** A novel algorithm for damage analysis of fatigue sensor by surface deformation relief parameters // Intern. Symp. on Operational Research and Applications (ISORAP). Marrakesh, Morocco, 2013. P. 678-684.
3. **Maruschak P. O., Panin S. V., Ignatovich S. R. et al.** Influence of deformation process in material at multiple cracking and fragmentation of nanocoating // Theor. and Appl. Fracture Mech. 2012. **57**, Is. 1. P. 43–48.
4. **Bornert M., Brémand F., Doumalin P. et al.** Assessment of digital image correlation measurement errors: methodology and results // Exp. Mech. 2009. **49**, Is. 3. P. 353–370.
5. **Коноваленко И. В., Марущак П. О.** Анализ погрешностей алгоритма идентификации трещин термоусталости // Автометрия. 2011. **47**, № 4. С. 49–57.
Konovalenko I. V., Marushchak P. O. Error analysis of an algorithm for identifying thermal fatigue cracks // Optoelectron., Instrum. and Data Process. 2011. **47**, N 4. P. 360–367.
6. **Bishop C. M.** Pattern Recognition and Machine Learning. N. Y.: Springer-Verlag, 2006. 738 p.
7. **Maruschak P., Gliha V., Konovalenko I. et al.** Physical regularities in the cracking of nanocoatings and a method for an automated determination of the crack-network parameters // Materiali in Tehnologije / Materials and Technology. 2012. **46**, N 5. P. 525–529.
8. **Панин С. В., Титков В. В., Любутин П. С.** Исследование эффективности алгоритмов фильтрации векторных полей при оценке деформации материалов методом корреляции цифровых изображений // Автометрия. 2013. **49**, № 2. С. 57–67.
Panin S. V., Titkov V. V., Lyubutin P. S. Efficiency of vector field filtration algorithms in estimating material strain by the method of digital image correlation // Optoelectron., Instrum. and Data Process. 2013. **49**, N 2. P. 155–163.
9. **Коноваленко И. В., Марущак П. О.** Автоматизированный метод диагностики деформационного поведения материала, повреждённого сеткой трещин термоусталости // Автометрия. 2013. **49**, № 3. С. 36–43.
Konovalenko I. V., Maruschak P. O. Automated method for studying the deformation behavior of a material damaged by a thermal fatigue crack network // Optoelectron., Instrum. and Data Process. 2013. **49**, N 3. P. 243–249.
10. **Mordeson J. N., Nair P. S.** Fuzzy Mathematics: An Introduction for Engineers and Scientists. Heidelberg: Physica-Verlag, 2001. 314 p.
11. **Buckley J. J., Eslami E.** Fuzzy plane geometry. I: Points and lines // Fuzzy Sets and Syst. 1997. **86**, Is. 2. P. 179–187.
12. **Кулешов Е. Л.** Критерий согласия на основе интервальной оценки // Автометрия. 2016. **52**, № 1. С. 30–36.

Поступила в редакцию 19 ноября 2015 г.